

# 电子图书



信息技术的结晶

人类文明的载体

网络的基本资源

## 总 序

顾明远

师范院校中有一门必修课，叫做教材教法，它是一门培养教师技能的专业课程，但是历来不受人们所重视，在一些专业学科的教师、专家们的眼里，似乎教材教法不过是剖析中小学的教学大纲和教科书，教会师范生如何去上好一堂课，没有什么学术性，他们认为，上好一堂课，保证教学质量的关键主要是有高的学术水平。这是一种误解，但是这种误解不是没有缘由的。原因之一是，这些专家们不懂得，教育既是一门科学，又是一门艺术，只有高深学问，不懂教育规律，没有掌握教育教学的艺术，课就上不好，或者事倍功半。原因之二是，过去的教材教法课确实存在着不少问题，它只分析现有的教材，不对学科、课程以及教育教学的规律进行研究。因此要解决这个问题，除了改变专家们的误解以外，更重要的是研究这门学科的发展，提高学科的理论水平。我认为，师范院校的教材教法不能只分析一门课如何讲授，更重要的是要研究、分析一门科学的发展历史和现状，以及其发展的内在逻辑，结合学生的认知特点，遵循教育规律，把它组织成一门学科。学科并不等于科学。一门科学要变成学校里的学科，需要经过一番改造。改造的理论就是一门学问，本身也应该是一门学科。这门学科是跨学科的，它既要研究某门学科的科学规律，例如数学教材教学既要研究数学教学规律，又要研究教育规律，要把两者有机地结合起来，从这个意义上来讲，教材教法的名称显得落后了。因此把它改为学科教学论或学科教育学是适宜的。

讲到这门学科还有一段历史，不得不讲一讲。我国学位制度建立之初，在教育学科门类中就设有教材教法作为二级学科培养研究生，授予学位。但是它的评议因为涉及文理各学科，因此分散在文理各学科评议组中，由于教材教法主要是研究学科教学的理论，文理各学科评议组的专家们认为难以对他们做出评议。这样这门学科的授权问题就处于无人评议状态。1983年在国务院学位委员会召开第二届博士、硕士授权点学科评议组会议期间，我向当时教育学评议组召集人刘佛年教授提出，把教材教法的硕士授权点拿到教育学组来评议，并把名称改为学科教学论，以提高对它的学术要求，从而提高它的学术地位。这个提议得到刘佛年教授的支持和学位委员会的批准，并在以后专业目录调整时把教材教法正式更名为学科教学论。从此学科教学论有了较大的发展，至今全国已有硕士授权点 19 个，培养了硕士研究生数百名，出版的专著也有几十部，这是十分可喜的现象。学科名称的更改是十分容易的事，要把它发展成一门真正的学科并非易事。当时有人提出改为学科教育学，我们认为时机还不成熟，首先要把学科的教学理论研究好。教育学是一个更广泛的概念，它涉及到教育系统内部各个领域，而学科教学论主要涉及教育系统中教学方面的理论，即使把

这部分研究透彻，成为一门学科也是不容易的。当然，有的学者愿意把它称为学科教育学，如果确已研究成熟，这无疑是对教育科学发展的一个贡献。把教材教法改造成为学科教学论是一次理论上的飞跃。教材教法过去只是教育学中的一个部分。学科教学论则变成了教育科学中的一个重要分支学科。这种飞跃有没有根据，具备不具备条件呢？1988年我在为《语文教育学》写序时就说，已经具备了必要的条件。这是因为：第一，近几十年来教学论、课程论、心理学、教育测量学、教育评价学等学科有了新的发展，它为学科教学论的建立奠定了理论基础；第二，我国改革开放以来引进了国外的各种教学理论，开拓了我们的视野，启迪了我们的思想；第三，我国有一批长期从事教材教法研究的学者，他们在师范院校有长期的教育实践，积累了丰富的经验，并且有较高的理论修养，这是建立学科教学论的组织基础。应该说，1978—1988年这门学科的建设是有成绩的，不仅培养了众多研究生和出版了多部专著，而且学科体系基本上建立起来了。更为可喜的事是不少专家都在关心这门学科的建设。得到各学科的专家的重视是至关重要的。因为学科教学论这门学科毕竟是跨学科的，文理各专业学科是它的基础。

这些年来，许多学者把学科教学论又提高到学科教育学的高度来研究，这又是一次飞跃。学科教育学不仅要研究学科的教学理论问题，而且要从教育学的基本原理出发，从培养人的高度来讨论学科教育的问题。它不仅要揭示学科教学的教学规律，还要揭示学科教学培养人的规律。学科教育学不仅要讨论该门学科如何设置课程，如何编制教材，如何选择教学方法，如何组织教学，更重要是要分析本门学科在培养人的整体工作中的地位和作用，并从这个角度出发研究课程、教材、教法，研究它与其他课程的关系，与学校中其他教育活动的关系等等。

广西教育出版社组织全国学科教育理论工作者和实际工作者编写一套大型丛书《学科现代教育理论书系》，我认为正是时候。这刚好是十多年来的一次大总结、大检阅。证明学科教育学这门新兴学科已经在中国大地上成长起来。我当然不可能通览这套丛书。但是从编辑出版计划中的书目可以看到，它涉及语文、数学、物理、化学、外语等中学教学计划中的主要学科，每门学科又分教学论、课程论、学习论、实验论、教育测量与评价等专著，有的学科还著有教学艺术论及其他更细的内容，真是丰富多彩。作者群中有老一代的学科教育学专家，也有年轻一代学者。我认为，这套丛书的意义，不仅在于它总结了十多年来我国学科教育学研究的成果，而且在于它展示了学科教育学发展的广阔前景，在于它锻炼了年轻一代学者。这是从教育理论战线上来讲的。至于对我国教育的实际来讲，这套丛书的出版一定有利于我国广大教师业务水平的提高，有利于教育质量的提高，我预祝出版的成功。

1996年春节



## 序

阎金铎

随着社会的进步,科学技术的发展,教育的普及和提高,物理教育研究也日益繁荣。物理教育,研究的对象是整个物理教育过程,即在物理学科范围内,结合物理的内容、特点和方法,研究如何发挥物理学科的实验功能、理论功能、应用功能、教育功能、培养功能等。也就是说,要从理论上和实践上,探讨如何进行物理教育和怎样提高物理教育质量和教育效率。

物理教育作为教育学科群的一个分支,以其特有的功能,在提高全民族的素质、培育社会需要的人才这一使命中,起着重要的作用。

为了进一步发展教育学科群体,构建具有我国特色的物理学科教育理论,反映国内当前的研究水平,深化教育改革,广西教育出版社组织出版了这套《学科现代教育理论书系》中的物理现代教育理论丛书。本丛书各册的作者,都是在该领域内有研究成就的教授、副教授和专家。全体编著者在编写过程中,突出科学性和实用性,力求准确、系统,体现教育改革精神,从物理教育的特点出发,着眼于提高物理教育、教学质量,分别探讨物理教育的有关理论及其应用。

本丛书共6册,内容简要介绍如下:

《物理教学论》论述物理教学的认识论研究、系统论研究和结构研究,探讨物理教学的模式、技术和艺术,研究物理概念教学、问题教学和物理教学方法。

《物理课程论》从物理科学与物理课程的概念、特点、课程的结构谈起,简要介绍国外物理课程的特点和我国物理课程的演变和现状,着重论述制订中学物理课程的思想基础、制约因素、教学内容的确定、教材编写要求、教材的评价与选用,以及物理课程的展望等。

《物理学习论》揭示物理学习的特点,剖析影响物理学习的因素,提出物理学习的基本原理,建立公理化的物理学习理论体系,以提高学习的质量和效率。

《物理实验论》以辩证唯物主义认识论为指导,通过对大量教学实例的剖析,论述物理实验的基本思想、基本方法和基本技能。特别是从我国中学物理实验教学的实际出发,对实验研究方法、实验设计方法和实验教学方法进行系统地探究。《物理思维论》系统地论述物理思维的概念、特点、品质、形式和方法,并对物理模型、概念的建立、规律的发现,以及物理创造性的思维的方式、结构进行研讨。

《物理能力测量研究》针对物理能力的概念和测量理论,探讨物理教学中能力培养的规律,提出检测的新方法——等价排除法。

本丛书的出版,得到广西教育出版社的大力支持,在各册成书过程中,

得到不少同行的关心，并参阅和借鉴不少的国内外学者的研究成果，在此一并表示感谢！我衷心地期望本书的问世，能够得到物理教育界的同行和广大读者的关注与指教，使这套丛书在深化物理教育改革和发展，发挥它应有的作用。

1996 年 6 月于北京师范大学

## 前 言

物理实验作为物理教学的重要基础、重要内容、重要方法和重要手段，在物理教学中具有重要的地位和作用。加强物理实验及其教学的研究，对于促进物理教学及其改革具有重要的意义。

笔者自 1982 年 1 月起，在已故的著名物理教育家朱正元先生的指导下，进行中学物理教材、实验和自制教具的研究工作，并于 1984 年 3 月为本系 80 级本科生首开了中学物理实验选论课程并自编了讲义，使我校成为全国最早开设这门课程的学校之一。之后，又为物理学科教学论研究生开设了中学物理实验教学研究方法课程，并于 1986 年完成了《中学物理实验教学研究方法》讲义。这本讲义共分《实验研究法》、《实验设计法》、《实验教学法》三册，比较系统地阐述了中学物理实验研究的基本思想、基本方法和基本技能。《物理实验论》这本书主要是在《实验研究法》的基础上，结合这些年来教学和研究的成果撰写的。

本书共分八章，内容是：物理实验与物理学发展、物理实验与物理教学、实验原理、实验方法和实验方案、实验装置和实验器材、实验条件的选择和实验操作、课堂演示实验教学策略以及数学方法的应用。

本书有以下几个特点：

1. 理论与实践紧密联系，研究方法（思想、技能）与研究实例有机结合，易于理解，易于操作。
2. 研究的思想方法从实验的不同环节、不同方面来论述，易于掌握，便于应用。
3. 大量的实例为实验教学和研究提供了大量的实验素材和研究范例，实用性强。

本书在撰写的过程中，得到了阎金铎先生的悉心指导和何醒、卢少■编辑的热情帮助，在此表示衷心的感谢。在这本书完成之际，我十分怀念我的导师朱正元先生。他老人家对我的谆谆教导，对中学物理教学、教材、实验和自制教具研究的思想和方法，使我终身受益。特别是他八十几岁高龄依然孜孜不倦地对中学物理教材和实验进行研究，直到生命的最后一刻，他为教育事业贡献毕生的精神，将永远激励我们。

陶 洪

1996 年 10 月于苏州大学

## 第一章 物理实验与物理学发展

一切自然科学都来自实践，都是在对自然现象观察的基础上从科学实验和生产实践中总结发展起来的。物理学的发展也是如此。但物理实验与物理观察和生产劳动并不完全相同。

物理（科学）实验是人们根据研究的目的，运用科学仪器设备，人为地控制、创造或纯化某种自然过程，使之按预期的进程发展，同时在尽可能减少干扰客观状态的前提下进行观测，以探究物理过程变化规律的一种科学活动。

观察是通过感官感受外部的各种刺激，形成对周围事物的印象。科学观察是有计划、有目的地对自然状态下的客观事物进行系统考察和描述的一种科学活动。科学实验与科学观察有共同点，即都是科学实践中搜集事实、取得经验的途径。但是两者间又有差异。首先，在实验中人们处于一种主动的地位，人们可以充分发挥主观能动性，控制条件、改变客观状态和进程，使自然现象的变化有利于得出规律性的认识；在观察中，人们处于一种被动的地位，人们只能等待自然现象按其本来的进程发展，对现象进行记录和研究。其次，实验结果是可以重复的，它不是简单的纯感性的活动，而是包括着深刻的理性思维。第三，观察常常是取得原始材料的基本方法。

观察常是实验的前提，实验是观察的发展。观察是搜集自然现象所提供的东西，而实验是从自然现象中提取它所要的东西。恩格斯说过：“单凭观察所得经验，是决不能充分证明必然性的。”科学史也表明：只有依靠实验的方法，并借助理性思维，才能达到“必然性的证明”。由此可见，实验和观察是两种不同层次的认识手段，起着不同的作用。

科学实验与生产劳动也有着本质的区别。前者以在科学理论指导下探索自然规律为主要目的，后者以直接改变自然、达到增加物质财富为目的，并不要求得到自然规律。虽然实验工作中也可以有劳动的成分，但它与生产物质财富的劳动有本质的不同。



## 第一节 物理实验在物理学发展中的地位

物理学是一门实验科学。在物理学中，每个概念的建立、每个定律的发现，都有其坚实的实验基础。实验在物理学的发展中有着巨大的意义和推动作用。

### 一 物理实验与古代物理学的发展

物理学的发展经历了从萌芽时期（古代物理学时期）到经典物理学时期再到现代物理学时期的发展阶段。在古代，亦即大约公元前七八世纪后，中国和希腊形成了东西方两个科技发展中心，科学已经以经验科学的形态从生产劳动中分化出来。但物理学还只是“自然哲学”的重要组成部分，人们主要是靠对自然现象和生产、生活很不充分的观察，以及简单粗糙的实验，直觉地、笼统地去把握物理现象的一般特性，物理学基本上还处在对现象的描述、经验的简单总结和思辨性的猜测阶段，实验的巨大作用还没有被充分认识到。尽管如此，在古代物理学发展的漫长历程中，不论是在中国还是在外国，有许多人曾做过许多实验或进行观测，对实验现象作过各种解释或总结，也提出过种种理论，还制造出了不少仪器，他们对古代物理的发展起了积极的推动作用。在西方，古巴比伦人曾用“日晷”和水钟计时，还发明了梁式天平；古希腊人泰勒斯最早记录了摩擦过的琥珀会吸引轻小物体，天然的磁石具有吸铁的性质；阿里斯托芬曾有过用玻璃点火熔化石蜡的记录；欧几里德曾有过用凹面镜聚集太阳光试验的记述。

阿拉伯人阿勒·哈增曾做过圆柱面镜、球面镜、锥面镜的反射和折射实验，他还用一根带有五个秤盘的奇妙杠杆，测定在空气中和在水中物体的重量，发现空气也有重量和阿基米德定律在空气中同样适用，等等。

这里，特别要提出的是古希腊阿基米德（公元前约 287—前 212）和托勒密（约 90—168）的实验。阿基米德对杠杆进行了实验和研究，总结出杠杆定律，即二重物平衡时所处的距离与重量成反比。他还发明了阿基米德螺旋提水器，并用滑轮做了许多实验。杠杆定律的发现和当时引起了轰动。阿基米德的另一个重要贡献是做了浮力实验，建立了浮力定律。他在《论浮体》一书中指出：“浸入液体的物体所失去的重量，就等于它排开的液体的重量。”这也是一个从实验总结为理论的定量实验。

托勒密曾用如图 1-1 所示的装置对光的折射进行了实验研究。在一个圆盘的中心 S 处装了两把可以旋转的尺子，将圆盘的一半竖直插入水中，转动两把尺子以便确定入射线和折射线的位置，从而测出入射角和折射角。用这样的方法托勒密测得了从空气射入水中的光线的一系列对应值。如：

|     |     |      |           |           |      |      |           |           |      |
|-----|-----|------|-----------|-----------|------|------|-----------|-----------|------|
| 入射角 | 0 ° | 10 ° | 20 °      | 30 °      | 40 ° | 52 ° | 60 °      | 70 °      | 80 ° |
| 折射角 | 0 ° | 8 °  | 15 ° 31 ' | 22 ° 30 ' | 29 ° | 35 ° | 40 ° 30 ' | 45 ° 30 ' | 50 ° |

这些数据足够精确。他断言，折射角与入射角成正比，这个结论只在入射角很小的情况下才近似正确。遗憾的是，他并没有由此发现折射定律。

在我国，从古文献、古器物中可以看到我们古代祖先的许多关于物理实验和应用的记载。早在尧舜时代，我们的祖先就用“圭表”来观象授时；后又使用“日晷”，即利用日影位置的变化测量时间；至春秋时期已普遍使用“刻漏”，利用水滴滴漏的方法来计时，我国在春秋时期的度量衡制已日趋完备；到了秦朝，我国的度量衡制得到了进一步发展和统一。

在力学实验方面，据《墨经》所载，墨家就研究过圆球的随遇平衡问题，已初步认识了简单几何体的重心问题。半坡村出土的斂器（尖底双耳瓶）也说明了古人早就注意到了重心的作用。对于测定固体比重的方法，《考工记》中就记载了用水浮法来进行定性的估测。对于液体比重的测定，最迟到东汉就已测出“水一升重十三两”（《后汉书·礼仪志》）。原始的液体比重计早在唐代《西阳杂俎》中就已有记载：莲子放在水中一定下沉，放在制盐用的咸卤中则能浮着。到元代陈椿（《熬波图咏》）把莲子放在4种浓度不同的卤水中浸泡，形成4种比重不同的莲子，然后将它们同时放入同一种卤水中，视其浮起来的数目多少来推断卤水比重的大小。这与现代的浮子式比重计原理基本相同。《考工记》中“舆人为车”就记载了水平仪的雏型。到了北魏，水平仪已被配置在较精密的仪器上，如用铁铸成的浑天仪底板上设有“十字水平”，以校准仪器水平。对于浮力的认识，《墨经》中已指出物体所受的浮力是因为水被物体排开的关系。晋代的《苻子》就已记载了利用水浮法称重的实例。《宋史·方技传》记载了利用浮力起重——打捞铁牛的实例。

对于简单机械，早在春秋时期就已有了使用权衡——天平与杆秤的记载。《墨经》中记载了墨家实验研究杠杆原理的做法：天平横梁的一臂加重物，另一臂必需加砝码，两者必须等重才能平衡；杆秤的提纽到重物的一臂比较短，提纽到秤锤一臂比较长，如果两边等重，秤锤一边必下落。到了周代史佚发明了杠杆和滑车的混合体——辘轳。

在声学实验方面，《墨子》中就曾记载了（运用固体传声和气腔共振）将两种稍有不同的坛埋入地以判断地下声源的方法。《庄子·杂篇》中就记载了当时在乐器制作后做过的很细致的共振实验。《异苑》中曾记载了张华（232—300）改变器物的固有频率以消除共鸣的方法。宋人沈括在《梦溪笔谈》中记载了他所设计的最早的用纸人演示共振的实验：“欲知其应者，先调其弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高低苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦振，此之谓正声。”在热学实验方面，《考工记》中记载了利用凹球面镜对日聚焦取火。西汉《淮

南子》记载了一种利用两个重量相同而吸湿能力不同的物体来验湿的天平式验湿器，书中还记载了“艾火令鸡子飞”的关于“热气球”的实验设计。唐代盛行的“马骑人物、旋转如飞”的走马灯，宋代的“走线流星”、“地老鼠”等“火箭”，都是利用热空气流直接推动的装置。

在电磁学实验方面，早在《管子》、《吕氏春秋》、《三国志》中就有磁石能吸铁而不能吸铜等其他金属和非金属的记载。对静电力的研究，《春秋纬·考异断》就说“玳瑁吸■”，三国时代发现“琥珀不取腐芥”。晋人《博物志》中记载了摩擦起电。在对磁性的进一步实验研究方面，西汉《淮南万毕术》记载了“慈石提棋”、“慈石拒棋”的磁体相吸、相斥现象，并介绍了鸡血中拌入磁粉和铁粉后晾干，以得到人造磁体的方法。汉代王充的《论衡·是应篇》记载了利用磁体指极性制造指南仪器“司南”。北宋初年《武经总要》记载了用“地磁感应法”制作人造磁体，以及将“司南”改为“指南鱼”的方法。沈括的《梦溪笔谈》记载了“以磁石磨针锋，则能指南”的“磨擦传磁法”，以及对“指南鱼”进行了实验改进，发现了指南针的四种支悬方法，如图1-2所示。

在光学实验方面，古人曾做过大量的较系统的研究。《墨经》中阐述了影的成因，本影、半影的生成，反射成影及影的大小的变化规律；记载了小孔成像，光的反射，平面镜、凸面镜、凹面镜反射成像以及像的大小、像的正倒与位置的实验。《墨经》的光学（和光学实验）比欧几里得光学还早一百多年。西汉《淮南万毕术》记载了“高悬大镜，坐见四邻”的潜望镜雏形，以及以冰来制作凸透镜用以对太阳聚焦取火。沈括在《梦溪笔谈》中记载了研究针孔成像、凸面镜、凹镜成像规律的实验。

这里特别要指出的是，宋末元初的赵友钦在《革象新书》中记载了对光的针孔成像和照度进行的设计巧妙的大型实验研究，如图1-3所示。他以楼房为实验室，在楼下左右两房间地面上挖两个圆井，井深分别为 $\frac{8}{3}\text{m}$ 和 $\frac{4}{3}\text{m}$ 。左井中可放一个 $\frac{4}{3}\text{m}$ 高的桌子。井底（或桌面上）可放1000

多支蜡烛做光源。井口可分别用中心开孔的木板加盖。楼板下挂两块大木板为固定像屏。实验可分为五个部分。

(1) 光源、小孔、像屏三者距离保持不变，孔径有大小之别，可见两个像大小一样，但浓淡（照度）不同。

(2) 利用针孔成像来模拟日月蚀，并表明针孔所成之像为倒立像。

(3) 改变像距，研究像的大小与照度随像距而变化的规律，实验得到照度随光源的强度增加而增加，随距离的增加而减小（在西方，400年后才由德国科学家兰伯特得出照度跟距离平方成反比的定律）。

(4) 改变物距，实验表明物距变大，像变小变狭，但变浓。

(5) 改变孔的大小和形状，研究大孔成像与小孔成像的区别。

赵友钦的这一大型实验可以说在世界物理学史上是首创的。综上所述，在古代物理学的发展中，中外物理学先驱者们的大量的实验工作，不

管是从系统的观测和记录方面来看，还是从在人为条件下重复物理现象、确定量度标准和仪器、制造实验和观测仪器等方面来看，都可称之为物理实验。其中，阿基米德的浮力实验、托勒密的光学折射实验、赵友钦的小孔成像和照度实验等，甚至可称之为卓越的物理实验。

在这一时期，物理实验的特点是：①零星不系统；②定量实验较少、定性实验较多；③大多数实验仅限于现象的描述或一般的解释，没有进行归纳而形成系统的理论；④没有用实验来检验已有的理论。

由此可见，在这一时期的实验方法和实验的科学思想水平还是较低的，这就使得物理学还没有真正走上科学的道路。

## 二 物理实验与经典物理学的发展

经典物理学是在 16、17 世纪的文艺复兴时期和科学革命中诞生的。以伽利略为代表的一大批杰出科学家，把实验方法与物理规律的研究结合起来，对物理学的发展做出了划时代的贡献。下面我们简单地回顾一些在经典物理发展中有重要地位的著名实验。

在力学实验方面，伽利略 (Galileo Galilei, 1564—1642) 的斜面实验和落体实验，发现了运动定律和自由落体规律。17 世纪中叶在碰撞的实验研究中，瓦利斯 (J. Wallis, 1616—1703)、惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 和马略特 (E. Mariotte) 分别得出了动量守恒定律。

库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 的扭秤实验和摩擦实验，得到了库仑力的平方反比定律和摩擦定律。

胡克 (R. Hooke, 1635—1703) 的弹性实验，发现了弹性的基本定律。

傅科 (J. B. L. Foucault, 1819—1868) 的傅科摆实验，验证了泊松 (Poisson) 的关于地球自转引起的偏转力的理论；傅科继续用实验研究地球自转的力学问题，发明了回转仪。

卡文迪许 (H. Cavendish, 1731—1810) 用扭秤装置测定地球密度，得到了地球密度和引力常数。引力常数是基本物理常数之一，它的数值对物理学和实际工作有重要意义。表 1-1 为历年来实验物理学家对引力常数的测定结果①。

表 1-1 引力常数的测定

| 年代   | 人名              | 方法      | 引力常数( $\times 10^{-11}\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ ) | 不确定度( $\times 10^{-6}$ ) |
|------|-----------------|---------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1798 | 卡文迪许            | 静态扭秤    | 6.75 (4)                                                       | $6 \times 10^3$          |
| 1891 | 波印廷             | 化学天平    | 6.6984                                                         |                          |
| 1895 | 波依斯             | 静态扭秤    | 6.6576                                                         |                          |
| 1930 | 赫尔 (Heyl)       | 动态扭秤    | 6.670 (5)                                                      | $7.5 \times 10^2$        |
| 1942 | 赫尔              | 动态扭秤    | 6.673 (5)                                                      | $7.5 \times 10^2$        |
| 1969 | 罗斯 (Rogc)       | 加速转动参照系 | 6.674 (3)                                                      | $4.5 \times 10^2$        |
| 1972 | 庞蒂基斯 (Pontikis) | 动态扭秤    | 6.67145 (10)                                                   | 15                       |
| 1981 | 卢瑟 (Luther)     | 静态扭秤    | 6.6726 (5)                                                     | 75                       |

厄缶 (B. ovn.Eotvos, 1848—1919) 用扭秤方法研究惯性质量和引力质量的等价性, 得到了非常精确的结果, 为引力理论的确立奠定了重要的基础, 被爱因斯坦 (A. Einstein) 称做“为扩充相对论辩护的著名的物理事实”<sup>①</sup>。在热学实验方面, 最基本的是量热学实验。布莱克 (J. Black, 1728—1799) 和他的学生通过对量热学实验研究发现了热容量, 提出了比热的概念, 发现了热量守恒定律。量热学实验在热学发展中起了重要的作用, 它使热学走上了严格定量的道路。

伦福德 (Rumford, 1753—1814) 的摩擦生热实验和戴维 (H. Davy, 1778—1829) 的冰摩擦生热的实验为热的运动说提供了有力的支持, 成了能量守恒与转化定律的前奏。

焦耳 (J. P. Joule, 1818—1889) 从事热功当量实验研究 30 多年, 为热和功的相当性提供了可靠的依据, 为能量守恒与转化定律的确立奠定了牢固的实验基础。

分子速度分布律是分子运动论和统计力学的重要理论基础。1859 年麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 提出气体分子速度分布律后, 就于 1860 年做了著名的气体粘滞性随压强改变的实验, 对速度分布律做了间接验证。1911 年杜诺依尔 (L. Dunoyer) 设计并制成了分子束装置。1920 年后斯特恩 (O. V. Stern, 1888—1969) 等人用分子束实验技术对分子速度分布律进行直接验证, 直到 1955 年才被米勒 (R. C. Miller)、库什 (D. kusch, 1911—) 精确测定。

布朗运动是分子无规则热运动的有力证据, 它的研究对认识分子、分子的存在有重要意义。1827 年布朗发现了布朗运动, 并对它进行了长期的实验研究。1906 年爱因斯坦提出了布朗运动理论。佩兰 (J. Perrin, 1870—1942) 对布朗运动理论进行了全面的实验验证, 证明了液体中分布微粒的乳浊液分布方程和布朗运动位移公式, 为分子的存在提供了直接证据。

在电磁学实验方面, 库仑定律的发现和检验是实验的一个重要的贡

献。库仑定律是电磁学的基石，也是麦克斯韦方程的基石。如果库仑力与距离平方反比定律有偏差，那么麦克斯韦方程就要做重大修正，光子就应有静质量，不同频率电磁波就有不同速度，狭义相对论的光速不变原理就要被否定，等等。从 1769 年起，为了证明电荷之间的作用力与距离平方反比的规律，罗比逊的转臂支架实验、卡文迪许的同心球实验、库仑的电扭秤实验和振荡电扭秤实验、麦克斯韦改进的同心球实验等，都做了精确的确定。表 1—2 是历次库仑定律实验验证的结果①。

表 1—2 库仑定律验证结果和光子的静质量

| 工作者     | 年代   | 库仑定律的指数偏差<br>$\delta$ 不大于       | 由此推算得出的光子静<br>质量大于 (g) |
|---------|------|---------------------------------|------------------------|
| 罗比逊     | 1769 | $6 \times 10^{-2}$              |                        |
| 卡文迪许    | 1773 | $2 \times 10^{-2}$              |                        |
| 库仑      | 1785 | $4 \times 10^{-2}$              |                        |
| 麦克斯韦    | 1873 | $4.9 \times 10^{-5}$            |                        |
| 普林普顿、洛顿 | 1936 | $2.0 \times 10^{-9}$            | $3.4 \times 10^{-44}$  |
| 柯克朗、富兰肯 | 1967 | $9.2 \times 10^{-12}$           | $3 \times 10^{-45}$    |
| 巴尔特勒特等人 | 1970 | $1.3 \times 10^{-13}$           | $3 \times 10^{-46}$    |
| 威廉斯等人   | 1971 | $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ | $1.6 \times 10^{-47}$  |
| 薛定谔     | 1943 |                                 | $2 \times 10^{-47*}$   |
| 金斯伯格    | 1963 |                                 | $8 \times 10^{-48*}$   |
| 尼特、哥德海伯 | 1968 |                                 | $4 \times 10^{-48*}$   |
| 凡伯      | 1969 |                                 | $10^{-44**}$           |
| 戴维斯等人   | 1975 |                                 | $7 \times 10^{-49***}$ |

\*从地磁数据检验安培环路定律得到的数据。

\*\*根据光的色散得出的数据。

\*\*\*从木星磁场测得的数据。

奥斯特 (H. C. Oersted, 1777—1851) 对电流磁效应的惊人发现既证实了电与磁之间相互联系的客观存在，又发现了沿垂直方向起作用的一种旋转力。奥斯特实验开创了电磁学的繁荣时期。安培 (A. -M. Ampere, 1775—1836) 把奥斯特实验扩展为电流之间的相互作用，并提出了安培定则。为了定量研究电流之间的相互作用，安培设计了四个极其精巧的实验，并在这些实验的基础上进行数学推演，得出了普遍的电动力公式，为电动力学奠定了理论基础。

法拉第 (M. Faraday, 1791—1867) 对磁产生电进行了多年的实验研究，终于在 1831 年 8 月 29 日发现了电磁感应现象，他还对各种试验结果归纳总结，把产生感应电流的情况分为五类：①变化中的电流；②变化中的磁场；③运动的稳恒电流；④运动中的磁铁；⑤运动中的导线。

罗兰 (H.A.Rowlemel, 1848—1901) 实验确证了电流的磁效应，它不

但进一步明确了电与磁的联系，而且促进了洛伦兹电子论的形成，奠定了电学近代理论的基础，在电磁学发展史上具有重要意义。

麦克斯韦的电磁场理论把电、磁和光三个领域综合在一起，预言了电磁波的存在，预见了光也是一种电磁波，具有划时代的意义。赫兹

(H. Hertz, 1857—1894) 通过实验发现了电磁波，并证实它的传播速度正是光速，有力地证实了麦克斯韦电磁场理论。在光学实验方面，牛顿

(I. Newton, 1642—1727) 从笛卡尔的棱镜实验得到启发，又借鉴胡克和玻义耳的分光实验，成功地进行了白光的色散和复合实验。这一实验具有重要的意义，它不仅对认识光的本性和建立颜色理论奠定了基础，而且为光谱学的发展开辟了道路。

托马斯·杨 (Thomas Young, 1773—1829) 的双缝干涉实验为光的波动学说提供了确凿的证据。

光速是基本物理常数之一，早在 1676 年罗默 (O. Römer, 1644—1710) 在定期观测木星的卫星运动中，首先获得了光速有限的证据： $c \approx 2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。1728 年布拉德雷 (J. Bradley, 1692—1762) 根据恒星光行差算得光速为  $c = 3.1 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。为了能对光的波动说和微粒说进行判决，更需要测出光速。19 世纪 50 年代后，斐索 (Fizeau, 1819—1896) 和傅科分别用实验方法测量了光速。斐索用旋转齿轮法测得  $c = 3.153 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

傅科用旋转镜法测得  $c = 2.98 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。1874 年考尔纽 (M. A. Cornu) 改进了斐索的旋转齿轮法，测得  $c = 2.9999 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。迈克尔孙

(A. A. Michelson, 1852—1931) 1878 年测得  $c = 3.00140 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，1879 年测得  $c = (2.99910 \pm 0.00050) \times 10^8 \text{ m/s}$  (图 1—4 为实验示意图)，1882 年测得  $c = (2.99853 \pm 0.00060) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。1923 年迈克尔孙主持了大规模的实验 (如图 1—5 所示)，直至 1927 年他先后进行了 5 次实验，结果惊人一致，测得  $c = (2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

迈克尔孙和莫雷 (E. W. Morley, 1838—1923) 利用巨大的迈克尔孙干涉仪，为证明以太的存在而进行了一次又一次地测量以太漂移速度的实验，最终测得以太的漂移速度为零。

这是一个具有重大历史意义的实验，它对 19 世纪占统治地位的以太理论以沉重的打击，激励了当时一些著名的物理学家对运动物体的电动力学理论的研究，从而为爱因斯坦创立狭义相对论铺平了道路。

19 世纪初，沃拉斯顿 (W. H. Wollaston) 观察到太阳光谱的不连续性。弗琅和费 (J. V. Fraunhofer, 1787—1827) 用望远镜观测太阳光谱，对太阳光谱中的黑线进行了研究。惠斯通 (Charles Wheatstone, 1802—1875) 用不同的金属电极的电火光做光源，发出了不同金属有不同的谱线，可以作为各自的特征。1859 年基尔霍夫 (G. R. Kirchhoff, 1824—1887) 1859 年对光的吸收和发射之间的关系做了更进一步的研究，发现在同一温度下所有物体对同一波长的光线，其发射本领和吸收本领之比是一常数，



这一定量的基本定律叫基尔霍夫定律。这一定律不仅奠定了热辐射的理论基础，也是光谱学的重要规律。基尔霍夫和本生（R. W. Bunsen, 1811—1899）采用的光谱分析实验方法，对自然科学各个分支都有重要意义。

1882 年罗兰成功地刻制了凹面光栅，并用它拍摄了精细的太阳光谱图。凹面光栅大大地推动了光谱学的发展。1896 年塞曼（Pieter Zeeman, 1865—1943）效应的发现和 1931 年氙的发现所用的光谱仪器都是罗兰的凹面光栅。物理学由于光谱实验提供了极其丰富的原子信息而引起了深刻的变化。

由上可见，经典物理实验对于经典物理学的发展起到了很大的推动和促进作用，它在经典物理学中的地位是极其重要的。我们现在以伽利略对自由落体问题的研究为例，探讨以伽利略为杰出代表的经典物理实验研究方法和科学思想的特点。伽利略在比萨大学任教时就开始对自由落体进行研究，直到 1638 年才在《关于力学和局部运动两门新科学的谈话和数学证明》中系统地论述这一研究成果。

伽利略首先从一个理想实验得出的谬误入手，对亚里士多德的落体学说（即物体的下落速度与其重量成正比的学说）提出反驳，证明这一学说是错误的。自由落体运动是否符合亚里士多德提出的是匀加速运动呢？伽利略认为应该用实验做出检验。但要直接验证  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  是恒量在当时是困难的。

于是伽利略运用数学，根据他的假设推出了匀加速运动通过的距离与时间的平方成正比，即

$$\frac{s}{t^2} = \text{常量}$$

这一便于直接测定的关系式。

为了“冲淡重力”、减缓下落运动，伽利略进行了著名的斜面实验。实验发现：一个从静止开始下落的物体在相等的时间间隔经过的各段距离之比等于从 1 开始的一系列奇数之比，即为 1：3：5：7…从而证实了落体所经过的各种距离总是同所用时间的平方成正比例。

为了把斜面实验的结论推广到竖直情况下的自由落体运动，伽利略提出了等末速度假设，即静止物体不论是沿竖直方向还是沿不同斜面的同一高度下落，到达末端时具有相同的速度，也就是说，物体在下落中所得到的速度只由下落的高度决定，而与斜面的倾斜程度无关。对此，伽利略用了一个单摆实验（如图 1—6 所示）验证了这个假设。根据这个假设，可得到沿斜面下滑的加速度  $g_1$ ，与自由下落的加速度  $g$  之间的关系（如图 1—7 所示）。

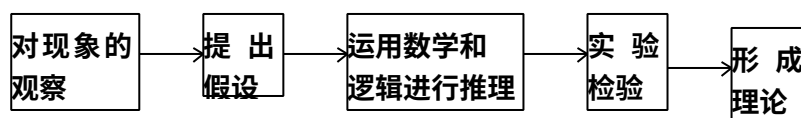
$$\frac{g_1}{g} = \frac{t}{t_1} = \sin a$$

由这个关系，不难从  $g_1$  求出  $g$ 。伽利略根据这个关系明确得出了自由落体做匀加速运动的结论。



从上面伽利略发现自由落体定律的经过，我们可以看到伽利略实验研究方法和实验科学思想的特点。

(1) 把实验与数学结合起来，既注意逻辑推理，又依靠实验检验，构成了一套完整的科学研究方法。其程序大致如下：



伽利略的实验检验包括物理的（实际的）或思想的实验检验，形成的理论包括对假设进行的修正和推广。

(2) 有意识地在实验中抛开一些次要因素，创造理想化的物理条件。既要力求使实验条件尽可能符合数学要求，以便获得超越这一实验本身的特殊条件的认识，又要设法改变实验测量的条件，使之易于测量。例如，物体下落时不考虑空气阻力；“冲淡重力”进行斜面实验；把物体自由下落的时间“放大”，以便在当时能够测量。

(3) 用实验去验证理论。伽利略认为科学实验是为了证明理论概念（或观察规律）而去做的，不应该是盲目的、无计划的；而理论（数学）又必须服从实验判决。

(4) 把实验与理论联系起来。例如，把各物理量之间的关系用数学表达式联系起来，使实验结果上升到普遍的理论高度。再如，伽利略在实验的基础上，进行理论的演绎和逻辑的推理，可得出越过实验本身的更为普遍的理论结论。他认为，“实验可以用来决定一些原理，并作为演绎方法的出发点。”<sup>①</sup>伽利略把科学的实验方法发展到了一个全新的高度，从此开始了物理学的一个新的时代，使物理学走上了真正科学的道路。爱因斯坦和英费尔德（L. Infeld）在《物理学的进化》中评论说：“伽利略的发现以及他所用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”

### 三 物理实验与现代物理学的发展

经典物理从 16 世纪到 19 世纪末，历经 300 年的发展，已达到了比较完整和成熟的阶段。当时不少物理学家认为，物理学的基本理论已经完善，以后只需对一些细节问题进行补充和修正，对一些物理常数测得更精确一些就可以了。正当 19 世纪末物理学家庆贺物理学大厦落成之际，科学实验却发现了许多经典物理无法解释的事实。其中，电子的发现、X 射线的发现和放射性现象的发现具有根本的意义，被称为世纪之交物理学的三大发现。这些事实与经典物理的理论产生了尖锐的矛盾，从而引起了物理学的